

工程断裂力学

李洪升 周承芳 编



大连理工大学出版社

内 容 提 要

本书系统地讲述了断裂力学的基本概念和基本原理,其中包括一些近期进展成果,并详细地讨论了断裂力学在工程问题上的应用。

本书叙述简明易懂,内容较系统全面,包括线弹性断裂力学、弹塑性断裂力学、疲劳断裂、断裂力学的统计理论、不同环境下的断裂、断裂参数的实验方法和有限单元法、工程结构断裂安全评定方法等内容。

本书可作为机械、动力、石油化工、宇航及力学等专业本科生与研究生的教材,可供从事结构的断裂安全评定与设计的工程技术人员参考。

工 程 断 裂 力 学 Gongcheng Duanlie Lixue

李洪升 周承芳 编

大连理工大学出版社出版发行(大连市凌水河)
大连凌水印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 10 7/16 字数: 242千字
1990年3月第1版 1990年3月第1次印刷

印数: 0001—1500册

责任编辑: 卢平晶

责任校对: 杜祖诚

封面设计: 葛 明

ISBN 7-5611-0280-1/TB·11 定价: 2.24元

前 言

本书是作者在多年教学和科学研究工作的基础上，参照国内外已公开出版的专著编写而成的。在内容上系统地阐述了断裂力学的基本概念和原理，详细地介绍了应用这些原理分析问题的方法和步骤，并指出了选择与应用这些原理可供遵循的途径。其中，第一章绪论，介绍了断裂力学的产生与发展，概述了断裂力学的内容。还就断口分析基本知识进行了综述。第二章线弹性断裂力学，重点围绕应力强度因子和断裂准则 K （准则、 G 准则及复合型准则）进行了详尽的论述。第三章全面介绍了弹塑性断裂力学理论，其中包括 COD 准则， J 积分准则及工程应用的方法。第四章讨论了疲劳裂纹扩展的基本特性，给出了估算裂纹扩展寿命的基本方法。以上四章是基本理论部分，其中包括了近期的理论成果。

第五章是常规断裂韧性参数测试方法。第六章是断裂力学的可靠性分析，也称之为概率断裂力学。它是把断裂力学原理与概率统计理论结合起来，不仅给出结构物断裂安全的数值指标，而且还给出了这种指标的可靠度。这对于宇航与原子能等部门的应用是十分重要的。第七章是双准则法，它是把线弹性断裂力学方法与塑性极限分析方法结合起来，对压力容器等设备的断裂安全分析与设计是很有效的方法，而且有助于进行敏感性分析。第八章阐述了环境条件下的断裂

力学问题，其中包括应力腐蚀，腐蚀疲劳，高温及蠕变条件下的断裂安全评定方法等。这三章可以说是工程上断裂安全与设计的综合方法。第九章是介绍工程复杂问题的断裂参数的有限单元法，为各种工程问题的断裂参数的数值计算提供了途径。

本书的特点在于理论内容系统全面，并着重于应用。在理论分析上力求简明透彻，在内容的编排上详略适中，适于作为教材使用；理论与应用结合密切，适合于广大工程技术人员参考；有详细的实验测试方法，为实验研究提供参考依据；既有基本理论又有详尽的典型例题，为自学者提供了方便；断裂力学参数的有限单元法，为复杂的工程问题的数值计算提供了有效途径。

本书在编写过程中，得到了唐立民教授的支持和关怀，邬端锋教授认真地审阅全稿，提出很多宝贵的意见，顾朴教授审阅了部分章节，沈梧教授，陈浩然教授，张允真、许善国副教授都给予了关心和帮助，在此一并表示衷心地感谢。

由于编者水平所限，错误和不足之处望批评指正。

编者

1989年8月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
§ 1-1 断裂力学的产生.....	1
§ 1-2 断裂力学的内容和概况.....	5
§ 1-3 材料韧性.....	8
§ 1-4 断口分析的基本知识.....	11
1-4-1 金属断裂的类型, 断口分析方法.....	11
1-4-2 宏观断口分析.....	14
1-4-3 断口的微观分析.....	16
第二章 线弹性断裂力学	20
§ 2-1 裂纹的类型, 裂纹尖端附近的应力场、位移场和 K 准则.....	21
2-1-1 裂纹的类型.....	21
2-1-2 裂纹尖端附近的应力场、位移场.....	23
2-1-3 K 准则.....	27
§ 2-2 应力强度因子 K 的计算.....	28
§ 2-3 能量释放率 G , G 准则.....	39
§ 2-4 能量释放率 G 与应力强度因子 K 的关系.....	42
§ 2-5 复合型断裂准则.....	45
2-5-1 最大拉应力准则.....	45

2-5-2	应变能释放率准则	48
2-5-3	应变能密度因子准则	48
2-5-4	工程上应用的经验公式	53
§ 2-6	小范围屈服下对应力强度因子 K 的修正	55
2-6-1	裂纹尖端屈服区的形状和大小	56
2-6-2	考虑塑性区应力松弛的塑性区大小	58
2-6-3	等效裂纹长度与应力强度因子修正	60
§ 2-7	裂纹扩展阻力曲线(R 曲线)的概念	63
§ 2-8	K 主导区, 线弹性断裂力学的适用范围	65
§ 2-9	脆性断裂评定的基本方法	68
§ 2-10	压力容器的脆性断裂安全评定	72
2-10-1	应力分析	72
2-10-2	应力强度因子 K_I 的计算	74
第三章	弹塑性断裂力学基础	77
§ 3-1	引言	77
§ 3-2	裂纹张开位移(COD)	81
3-2-1	COD准则和COD定义	81
3-2-2	弹塑性屈服情况下的COD计算	83
3-2-3	小范围屈服时COD与 K_I 的一致性	86
3-2-4	全屈服条件下的COD	87
3-2-5	弹塑性屈服时COD准则的应用	91
3-2-6	全屈服条件下COD准则的应用	93
3-2-7	压力容器临界裂纹长度估算方法	96
3-2-8	COD准则小结	98
§ 3-3	J 积分理论和应用	100
3-3-1	J 积分的定义和守恒性	100

3-3-2	在线弹性条件下 J 积分与 K_I 、 G 的关系···	105
3-3-3	J 积分的能量定义式·····	107
3-3-4	J 积分与裂纹尖端应力场(HRR 局部解)的关系·····	113
3-3-5	J 积分和 COD 的关系·····	116
3-3-6	J 主导条件·····	119
3-3-7	J 积分控制裂纹扩展的条件·····	122
3-3-8	J 积分的计算·····	130
3-3-9	工程评定方法——驱动力图法·····	139
第四章	疲劳裂纹扩展 ·····	144
§ 4-1	引言·····	144
§ 4-2	裂纹在交变载荷下的生成和扩展·····	147
4-2-1	疲劳过程的几个阶段·····	147
4-2-2	裂纹的亚临界扩展特性·····	150
4-2-3	高周疲劳与低周疲劳·····	151
§ 4-3	疲劳裂纹扩展速率·····	151
4-3-1	疲劳裂纹扩展速率的概念·····	151
4-3-2	疲劳裂纹扩展速率的经验公式·····	153
4-3-3	影响裂纹扩展速率的因素·····	157
§ 4-4	断裂力学在疲劳设计中的应用·····	161
4-4-1	疲劳设计的几种方法·····	161
4-4-2	疲劳裂纹扩展公式在常幅度交变应力问题上的应用·····	163
4-4-3	随机载荷下疲劳寿命的估算方法·····	171
4-4-4	Paris 公式在变幅加载条件下的修正···	172
§ 4-5	应变疲劳·····	174

4-5-1	应变疲劳	174
4-5-2	应变疲劳条件下的裂纹扩展速率	175
第五章	断裂力学实验	178
§ 5-1	平面应变断裂韧度 K_{IC} 的测试	178
5-1-1	测试原理和方法	178
5-1-2	试样型式、尺寸及装置	179
5-1-3	方法步骤	182
5-1-4	试验结果的处理及 K_{IC} 有效性判断	182
§ 5-2	裂纹尖端张开位移 COD 的测试	184
5-2-1	基本原理	184
5-2-2	实验方法概述	187
5-2-3	多试样阻力曲线法	191
§ 5-3	临界 J 积分值的测试	193
5-3-1	单试样法	194
5-3-2	多试样阻力曲线法	196
§ 5-4	疲劳裂纹扩展速率的测试	203
5-4-1	测试原理和方法简述	203
5-4-2	材料常数 n, C 的确定	204
5-4-3	门槛值 ΔK_{th} 的确定	205
第六章	结构断裂安全的可靠性分析	207
§ 6-1	可靠性概念和可靠度量度	207
6-1-1	可靠性定义	207
6-1-2	可靠度函数	208
6-1-3	已知分布的可靠度	210
§ 6-2	PFM 的一般原理	213
§ 6-3	PFM 的应用	220

§ 6-4	疲劳可靠性	227
6-4-1	初始裂纹不扩展的可靠性分析	227
6-4-2	安全裂纹扩展寿命的可靠性分析	229
6-4-3	疲劳裂纹扩展寿命计算机模拟	232
第七章 弹塑性断裂的综合设计准则——双准则法		
		234
§ 7-1	引言	234
§ 7-2	双准则法的基本公式	235
§ 7-3	破坏评定图	237
§ 7-4	J 积分建立的破坏评定图	240
§ 7-5	双准则法的应用	243
第八章 考虑环境条件下的结构断裂分析方法		249
§ 8-1	应力腐蚀	250
8-1-1	应力腐蚀的机理	250
8-1-2	氢脆	251
§ 8-2	应力腐蚀裂纹扩展	253
8-2-1	应力腐蚀临界应力强度因子 K_{ISCC}	253
8-2-2	应力腐蚀裂纹扩展速率 da/dt	254
§ 8-3	在应力腐蚀条件下的安全评定方法	256
8-3-1	构件的安全评定	256
8-3-2	应力腐蚀裂纹的扩展寿命	257
8-3-3	在应力腐蚀条件下的安全设计	259
§ 8-4	腐蚀疲劳	261
8-4-1	腐蚀疲劳裂纹扩展速率	261
8-4-2	腐蚀疲劳裂纹扩展速率的近似计算公式	262

8-4-3	腐蚀疲劳裂纹扩展寿命的计算	264
§ 8-5	高温断裂力学问题	265
8-5-1	概况	265
8-5-2	蠕变裂纹扩展速率公式	267
第九章	计算断裂参数的有限单元法	270
§ 9-1	引言	270
§ 9-2	普通单元法	271
§ 9-3	奇异单元法	272
§ 9-4	奇异等参单元法	273
§ 9-5	J 积分法	285
§ 9-6	虚裂纹扩展法	287
§ 9-7	弹塑性断裂参数的有限元计算	290
§ 9-8	疲劳裂纹扩展的有限单元法	291
附录	——常用的应力强度因子表	296
参考文献		318

第一章 绪 论

§1-1 断裂力学的产生

断裂力学是近三十多年来发展起来的一门学科，它的产生和发展是和生产实践紧密相关的，具体地讲，是与工程结构重大破坏事故的发生有密切关系。

自从第二次世界大战以来，高强度钢已广泛地应用于各种工程结构中，由于焊接技术的发展，建造了许多大型焊接结构物。结果是重大事故明显增多，尽管这些结构物都满足传统的设计要求，满足各种设计规范的要求。这种破坏往往是在低应力水平下突然发生的脆性断裂，在发生之前没有预兆，所以会造成灾难性的破坏。下面举几个破坏的实例：

1943~1947年间，美国数百艘全焊船中，发生一千多起脆性破坏，其中238艘完全报废，有的甚至断为两截。为了分析原因，从一百多个损坏处割下试件进行试验，结论是：断裂总是从焊接缺陷等应力集中处产生；断裂发生时的温度低；破坏处材料的冲击韧性值低于未破坏处的冲击韧性值。

50年代初，美国北极星导弹固体燃料发动机壳体，在试验时发生爆炸，材料用 $\sigma_s = 1373\text{MPa}$ 的高强合金钢，传统强度和韧性指标全部合格，而且爆炸时的工作应力远低于材料的许用应力。事后研究表明：破坏由宏观裂纹(深为0.1~1mm)引起的，裂纹源可能是焊缝、咬边、杂质和晶界开裂

等。

1965年英国北海的“海上宝石”号海上钻井平台，支柱上的拉杆发生脆性断裂，导致平台沉没。

1965年英国一个氨反应厚壁容器在进行水压试验时发生爆炸，该容器直径1.7m，高16m，用14.9cm厚的MnCrMoV钢板制成。原因是在焊接的热影响区内有裂纹存在，裂纹开裂导致破断。

1969年美国 F-111 飞机在训练飞行途中做投弹恢复动作时，左翼脱落，导致飞机坠毁。当时的飞行速度、总重量等指标远低于设计指标。主要原因是制造时热处理不当，机翼枢轴出现裂纹，漏检后经疲劳载荷作用，裂纹继续扩展，最后造成低应力破坏。

在有关的文献报导中专门收集了世界各国发生的大量严重破坏事故。这些事故虽然在工程结构总量中占的比例很小，但绝对数字还是相当大的。

这些重大破坏事故的发生使工程界感到震惊，因为这些结构物的破坏都是在满足传统设计要求的情况下发生的。人们感到，这不再是什么偶然因素的作用，一定是传统的设计思想忽略了什么。通过大量的调查研究，人们发现许多事故是发生在下面情况下：高强度钢或厚的中、低强度钢；低温条件下工作；焊接处或高度应力集中处。直接的破坏原因是结构物体中有裂纹存在，由于裂纹的扩展而引起结构的破断。近三十多年来，人们对含裂纹物体的破坏进行了大量的理论和试验研究，产生了断裂力学这门新的学科，为结构物的安全设计提供了新的思想和方法。

我们先来回顾一下传统的设计方法。

结构物在外力作用下的反应是以应力 (σ) 和应变 (ε) 这两个物理参数来描述的, 它们可以根据结构类型、尺寸和外力预先确定出来。结构物材料的物理性质可用屈服强度 σ_s 、抗拉强度 σ_b 表示, 它们是由宏观的力学试验测定出来的(还要测出材料的拉伸伸长率 δ 、断面积收缩率 ψ 和冲击韧性 CVN 等物理量作为选材指标)。通过建立 σ 与 σ_s 、 σ_b 之间的关系来满足安全设计的条件。具体的是建立了强度条件:

$$\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_s}{n_s} \quad (\text{塑性材料})$$

或者

$$\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_b}{n_b} \quad (\text{脆性材料})$$

这里 n_s 、 n_b 是安全系数。对于在交变载荷下工作的结构, 安全性条件是满足公式

$$\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_{-1}^0}{n}$$

即构件中的最大工作应力要低于某个使裂纹得以产生的交变应力值, 从而避免裂纹的产生, 以保证安全。式中的 σ_{-1}^0 是构件的持久极限, 它是由对光滑试件测定出的材料持久极限 σ_{-1} 进行修正(考虑尺寸效应、表面质量、应力集中等因素)得到的。

这种传统的设计思想的基础是建立在材料是连续的、均匀的假设上, 认为材料中没有裂纹和缺陷存在。实际上, 裂纹和缺陷是不可避免要存在的。这里所说的裂纹不是指分子、原子数量级或晶体数量级的微观裂纹, 而是指用低倍数工具显微镜或肉眼能够看到的宏观裂纹, 它们可以产生于下列各过程中: 冶金过程——存在夹渣、微孔; 工艺过程——

冷、热加工(轧制夹层、切割损伤), 热处理(会产生过高的内应力), 焊接(空穴缺陷、热影响区内应力); 使用过程——即使构件中原先无宏观裂纹, 由于材料的微观结构远非均匀的, 也不是各向同性的, 材料组织中不可避免地存在微裂纹, 在使用过程中的交变载荷作用下以及在腐蚀介质条件下, 微裂纹也会增大发展成为宏观裂纹。因此, 裂纹总是存在的。另外, 对存在的缺陷也不是都能发现的, 这是因为漏检是难免的, 以及因为现有的各种探伤方法(射线摄影、超声波探伤和磁粉探伤等)都有一定的灵敏度限制, 对细小的裂纹无法探出。所以结构物是难以避免带有裂纹进行工作的。

但并不是说存在裂纹就一定会发生断裂, 是否会发生断裂, 除了与裂纹长度、外力大小等因素有关外, 还和材料对裂纹的敏感度有关, 即和材料对断裂的抵抗能力的大小(通过引入新的物理参数——断裂韧度来表征)有关。断裂发生的三个主要因素: 裂纹长度, 载荷应力(外加应力, 残余应力, 外加应力+残余应力)和材料的断裂韧度。其它的诸因素如温度、载荷速率、应力集中、残余应力等只是影响上面的主要因素。断裂力学给出了发生断裂时三个主要因素之间应满足的定量关系式。

断裂力学抛弃了物体的连续性假设, 而从物体中含有裂纹这一前提出发, 以弹性力学和塑性力学为理论工具, 确定含裂纹体的应力场、位移场分布, 据此找出决定裂纹扩展的物理量。同时, 通过试验测定出材料抵抗裂纹扩展的能力, 并建立两者之间的关系, 即建立断裂的准则。上面这几点就构成了断裂力学的任务和领域。

可见，断裂力学是一门应运而生的新学科，它对传统设计概念的不足和不合理方面提供了补偿，从而成为现代工程结构安全设计方面的有力工具。

§1-2 断裂力学的内容和概况

发生在物体间的分离谓之断裂。对这一物理现象的研究是一个相当广阔的领域。

从研究模型上可以分为微观模型和宏观模型。微观模型本身可分为粒子、原子、分子等不同层次，现今，仅对晶体层次的模型进行了若干研究，下面所说的微观研究就是指的这种研究。宏观模型是指传统力学中采用的“微块”模型，宏观断裂力学也是建立在这种模型基础上。迄今为止对宏、微观这两种模型进行各自研究所采用的方法，得出的结论还统一不起来。宏观模型的研究结果和实践联系密切，实用性强，微观模型的研究基本上还处于纯理性的阶段。

从“断裂”所涉及的学科来说，包括固体物理学、金属学、冶金学、化学、力学等。从力学方面来研究“断裂”这一物理现象是大有作为的，这就形成了断裂力学这门学科。

断裂力学本身包括线弹性断裂力学和弹塑性断裂力学两大方面。在裂纹扩展前裂纹尖端如果无塑性区，或虽然存在塑性区，但塑性区范围尺寸较之裂纹长度小得多，这就是需用线弹性断裂力学的情况。当裂纹尖端塑性区尺寸增大到与裂纹长度同一量级或更大，这就是需用弹塑性断裂力学的情况。

另外，断裂力学还包括疲劳断裂、腐蚀疲劳断裂、高温蠕变断裂等专门课题。

断裂力学通过引入新的物理量和由它建立的准则，给出了全新的设计观念——断裂控制设计（用于静载）和损伤容限设计（用于交变载荷），允许含裂纹构件在保证安全的前提下继续工作，这是对传统的设计方法的补充和发展，为结构的安全设计做出了贡献。同时，断裂力学所阐述的概念和结论，对结构的选材、改进工艺、制定检验标准、评定可靠性、指导钢材制造等方面都是有重要指导意义的。

总的说来，断裂力学的研究，是在裂纹体中的能量转换和应力场分布这两个方向上进行的。

英国物理学家 A. A. Griffith (1921年) 通过对玻璃丝（一种脆性材料）的实际研究，认识到玻璃丝的实际强度比理论极限低 2~3 个数量级的原因在于里面存在许多极细的微裂纹，正是裂纹的存在削弱了强度。A. A. Griffith 提出了破裂的能量判据为：“使裂纹扩展所需要的能量刚好小于裂纹扩展时所降低的（释放出来的）弹性变形能”。Griffith 准则适用于玻璃等脆性材料，对金属不完全适用，因金属中的裂纹在扩展时尖端处会产生或大或小的塑性区，从而破断时要消耗塑性功。Orowan (1952年) 的工作考虑了塑性功而对 Griffith 理论进行了修正，从而推广到金属中去。

Griffith 的工作在当时没能引起重视，那时虽然破断事故也很多，常发生火车轮轴断裂，钢桥塌毁等事故，但多是由于材料本身的质量问题以及设计不良引起的，通过改进冶炼技术以减少夹渣等缺陷和改进材料的性能，通过合理设计

以避免严重的应力集中，就使得破断事故的发生得到了有效的控制，传统的设计思想仍然有效地发挥着作用。但在第二次世界大战中和战后，随着高强度（低韧度）钢的普遍使用和全焊接设计的引进，开始了一个新的结构破坏事故的时期。这就促进了断裂力学这门学科的发展。

Irwin(1957年)从裂纹尖端应力场出发提出了应力强度因子理论，使断裂力学的研究开始了一个新阶段。Griffith理论（简称 G 理论或 G 准则）和应力强度因子理论（简称 K 理论或 K 准则）一起构成了线弹性断裂力学的基本理论。近三十多年来许多学者在计算、应用等方面做出了许多贡献，使线弹性断裂力学理论日趋完善。

一般说来，线弹性断裂力学仅适用于材料韧性低、长裂纹的情况。而对于韧性好的中、低强度钢，以及小裂纹（材料可以是高强度钢），断裂前裂纹尖端处的塑性区足够大的情况，线弹性断裂力学不再适用，必须采用弹塑性断裂力学准则。随着断裂力学知识的普及，工程师不再单纯追求高强度（低韧度）材料，而是选用强度和韧性都适当好的材料，加以良好的设计和工艺及其检测，能在很大程度上避免长裂纹的出现，这就减少了发生脆性断裂的可能性，所以弹塑性断裂力学有着更大的实用意义。

通过对弹塑性断裂力学进行的广泛研究，提出的理论主要有：COD（裂纹尖端张开位移）理论(1960年)， J 积分理论（1968年）。这两个理论构成了弹塑性断裂力学的主体理论，它们能有效地评定裂纹的初始开裂。弹塑性断裂理论的近十年来的发展，也是围绕这两个主要理论尤其是 J 积分理论展开的，现今已能在一定限制条件下采用工程近似方法来